第 39 卷 第 1 期
2021 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 1
Mar., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.01.04

基于多源 GNSS 观测数据的三维电离层研究现状及发展

付乃锋[1,2]，常英立[3]

(1. 中国科学院 上海天文台 上海 200030； 2. 中国科学院大学 北京 100049； 3. 上海海洋大学 信息学院 上海 201306)

摘要： 近年来，随着 GNSS (global navigation satellite system)技术的发展，利用地基和空基 GNSS 电离层探测的空间特征，形成了更加完善的三维电离层观测系统，获得了丰富的多源 GNSS 电离层观测数据，促进了电离层在理论模型、经验模型及同化模型方面的进展，同时，通过结合中性大气及等离子层等方面的研究，为极端气象、太阳活动及磁暴等事件的监测与物理机制研究提供了数据基础与研究手段。介绍了多模地基及星载 GNSS 电离层观测数据发展现状，并讨论了空基 GNSS 电离层观测数据在电离层顶部区域经验模型改进方面的进展。指出电离层经验模型可作为同化模型的初始场，而电离层理论模型可将其作为卡尔曼滤波的动力学部分，以通过同化算法利用多源数据重建或预测电离层，并阐述了多源及多模 GNSS 电离层观测数据的增加背景下电离层同化模型构建过程中新的要求与发展。最后，提出自适应格网与机器学习可成为电离层同化算法方面的新研究方向，以促进三维电离层研究。

关 键 词： GNSS；电离层；经验模型；同化模型

中图分类号： P228 **文献标识码：** A

1 引 言

作为日地空间环境重要组成部分，电离层对现代无线电工程系统和人类的空间活动 (例如电离层与卫星导航系统定位的误差及地震异常密切相关[1, 2]) 有着重要的影响。研究电离层不仅有利于认识电离层本身、寻找克服电离层可能造成灾害的途径和探求利用电离层为人类造福的方法，也有助于推动地球科学领域相关电离层理论和应用问题的研究与发展。近年来，随着全球定位系统 (global positioning system, GPS) 和各国导航星座的建成及区域变

收稿日期： 2020-05-19； **修回日期：** 2020-06-17

资助项目： 国家自然科学基金 (U1831116, 11903064)；上海市自然科学基金 (17ZR1435700)；上海市科学技术委员会计划项目 (17DZ1100702)；上海市空间导航与定位重点实验室开放项目 (KFKT201906)

通讯作者： 常英立，ylchang@shou.edu.cn

形与空间环境监测项目的开展，迎来了地基 GNSS 及空基 GNSS 等多源电离层观测数据应用于电离层研究的新时代。

GNSS 卫星星座的增加与完善，全球及局部区域监测网的构建，以及支持多模 GNSS 接收机的广泛使用，使得地基 GNSS 电离层观测数据数目大量增加。地基 GNSS 电离层观测数据分布与地基监测站分布密切相关，在海洋区域、南美洲、非洲及俄罗斯，由于地面站的稀疏导致这些区域的电离层精度较差；导航卫星运动极慢，即使提高数据采样率，对穿刺信息几何分布的影响极小，数据空间分辨率的提高也并不显著。由于低轨卫星运动速度比导航卫星快，它可以高动态地进行全球范围的电离层探测。低轨卫星一般可以获得其定位数据提取的斜向路径电子总量 (total electron content, TEC) 及电离层掩星观测用于电离层模型构建。增加低轨卫星电离层观测数据，可以避免海洋数据缺失。现今具有掩星电离层探测功能的低轨卫星并不多，期待更多的低轨卫星星座建成并搭载电离层掩星天线，以构建更加完善的电离层全球观测系统。

由于电离层是一个非封闭系统，其理论模型即使具有极高精度的初始状态，也会随着时间积累而误差增大；而电离层经验模型虽然顾及了真实观测数据的空间特征与时间周期规律，甚至可以重现韦德海现象，但其本质只是一个统计模型，在极端空间环境依然有较大误差。通过利用多源电离层观测数据对电离层物理模式或气候模型进行更新，可获得更加精细准确的电离层结构。这三个方向的研究相辅相成：以卡尔曼滤波为同化模型核心模块，由于电离层经验模型精度较高可作为同化模型的初始场，而电离层理论模型可将其作为卡尔曼滤波的动力学部分。以前电离层观测数据主要来自电离层垂测仪以及非相干散射雷达，引入 GPS 电离层观测数据提高了电离层在时间与空间上的探测能力；但电离层观测数据依然比较少，难以实现磁暴或者电离层活跃期间的海洋区域异常捕获。

通过实测数据，建立电离层气候/经验模型，一个基于数据的模型来描述电子密度、电子温度、离子温度、离子组成等，以避免理论模型所产生的不确定性 (通常具有更好的精度，可以作为同化或者层析算法的背景场)。目前的电离层和等离子体层经验模型主要有 Nequick[3, 4], IRI (international reference ionosphere)[5–9], GCPM (global core plasmasphere model)[10], IRI_Plas[11–16]等模型。电离层 F2 层顶部区域空间环境复杂且探测数据少，传统模型存在较大误差。GNSS 电离层掩星观测数据通过反演可以得到低轨卫星轨道高度以下的电子密度剖线，可用来改善电离层顶部区域经验模型。

基于函数基或像素基，通过层析算法[17, 18]、卡尔曼滤波[19–23]/三维或四维变分/统计优化 (解形式具有等价性[24, 25]) 等方式对物理模式或气候模型进行同化更新，可以获得精细准确的电离层结构。层析算法可以基于背景场使用极小的内存与计算时间获得三维电离层信息，但是它并不能提供电离层下一刻时间的误差评估，也难以保证电子密度空间的连续性；为了获得连续的电离层三维结构，对电离层层析结果进行平滑，则会丧失电离层局部精细结构。通过引进可应用于气象学、海洋地质学以及地震学的同化算法，在物理机制、时间演化的误差评价，以及空间结构的连续性方面会有更好的结果，但同化模型对于计算机的内存及计算能力有极高要求。Huang 提出了一种先进的空间滤波方案，以避免 3D-Var 寻找背景场误差协方差逆矩阵[26]，极大缩短了计算机计算时间。Schunk 等人使用基于物理学的电离

层-等离子层模型和卡尔曼滤波器作为融合各种近实时测量资料的基础，开发了全球电离层同化模型 (global assimilation of ionosphere measurements, GAIM)；GAIM 模型缺少 GNSS 多星座数据的支持，电离层观测资料的时空分布较差[24, 27, 28]。Courtier 等人[29]和 Wang 等人[30]将四维变分用于随时间变化的观测数据，利用增量近似方法为四维变分的成本与收益权衡提供了灵活性。Yue 等人[21]将地基及空基 GNSS 电离层观测数据通过集合卡尔曼滤波同化模型进行了 2002 年到 2011 年三维电离层重分析，但是并没有使用四维变分及电离层物理模型。Fu 等人[31] 提出电离层同化需要考虑接收机与发射机的硬件延迟，以及利用双层分步同化方式提高电离层同化模型精度。在多源及多模 GNSS 电离层观测数据的增加背景下，由于多源观测的多样化数据特征及限于计算机内存与算力约束，对电离层同化模型构建过程有了新的要求与发展。

第 2 章介绍了多模地基及星载 GNSS 电离层观测数据发展现状。第 3 章讨论了空基 GNSS 电离层观测数据在电离层顶部区域经验模型改进方面的进展。第 4 章阐述了多源及多模 GNSS 电离层观测数据的增加背景下电离层同化模型构建过程中新的要求与发展。第 5 章提出自适应格网与机器学习可成为电离层同化算法方面的新研究方向，精细三维电离层结构通过利用理论模型/经验模型与多源电离层观测数据进行融合有了极大提高，并被付诸诸多方面应用与研究，以促进三维电离层研究。

2 多源 GNSS 电离层观测数据

电离层数据依照数据特征或探测方式可以分为以下三种。一种是太阳活动、磁暴情况、地磁变化等多种指征性数据，如地磁指数，地磁场扰动幅度/地磁行星指数，太阳黑子数等——它们只是对电离层及地球空间环境做出宏观的描述。另一种是通过直接探测手段获得的电离层数据，如来自于电离层垂直探测仪 (ionosonde)、非相干散射雷达 (incoherent scatter radar, ISR) 等手段的数据。这些方式覆盖范围小、探测成本高、探测时间短且连续性低，但获得的数据精度较高，可以作为电离层模型构建及验证的信息。最后一种是指 GNSS 技术发展以来，通过从微波穿过电离层得到的 GNSS 载波相位及伪距中解析出电离层影响，进而对电离层电子密度分布进行建模获得的相关电离层产品，如国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS) 的两维电离层图 GIM (global ionosphere model) 产品与 COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate) 系统通过 CDAAC/UCAR (the COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC) of the University Corporation for Atmospheric Research) 组织提供的电离层电子密度廓线 ionPrf 数据。以下将介绍基于 GNSS 技术间接探测获得的电离层数据特征、数量及分布等相关信息。

基于地基 GNSS 台站、低轨卫星和 GNSS 导航卫星，图 1 展示了空间科学在大气/海洋/电离层等方面的观测系统。以电离层为例，地基 GNSS 卫星系统及地面监测台站构成

了地基 GNSS 电离层观测系统；低轨卫星/GNSS 卫星构成了高层电离层观测及掩星电离层观测系统；低轨卫星间通过相互发射与接收信号形成低轨卫星间的电离层监测系统，例如 COSMIC/COSMIC-2 (分别发射于 2006 和 2019 年)；以 Jason-1/Jason-2/Jason-3 (分别发射于 2001, 2008, 2016 年) 为例，通过海洋垂直观测形成了海洋电离层观测系统。

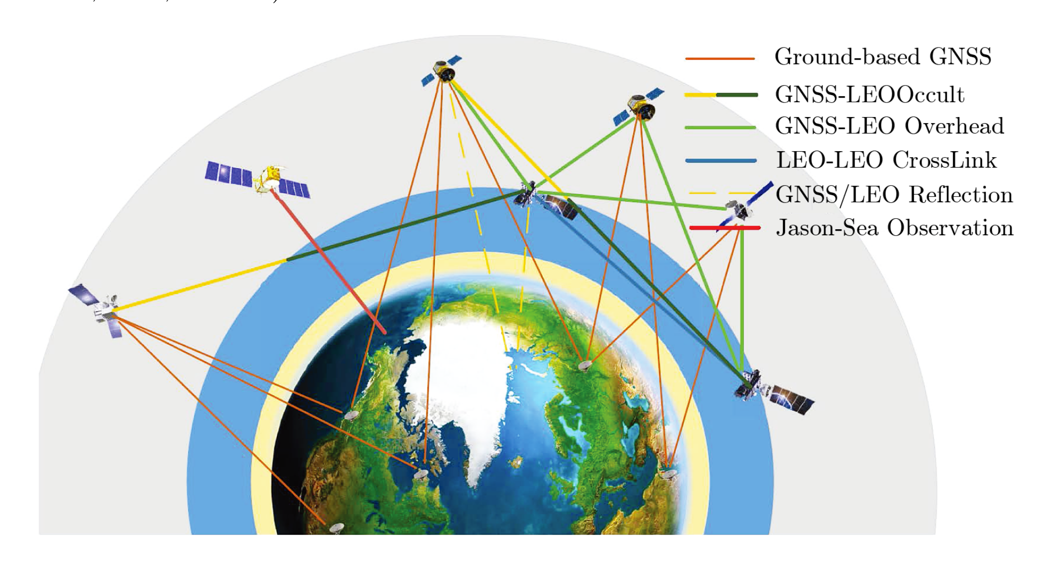


图 1　现在及将来中性大气/海洋/电离层数据观测系统

2.1　地基 GNSS 电离层观测

如图 1 所示，不同时刻 GNSS 卫星与地面台站间信号传递过程中形成棕色线指示的路径，它跨越了平流层、对流层、电离层以及等离子体层。卫星信号在不同圈层穿过时，由于不同圈层的物理特性对微波信号产生各种附加影响，虽然给 GNSS 定位带来了许多误差，但也为 GNSS 数据反演各个圈层的物理特性提供了条件。

现在已有完善的 GNSS 卫星星座，包括 GPS, GLONASS (Global'naya sputnikovaya navigatsionnaya sistema), Galileo, Beidou 等导航系统。各系统卫星具有不同轨道设计方式及特征，使得混合系统可以保证地面上每个台站至少有十几个卫星可见。以地基 GNSS / IGS 观测系统为例，30 s 采样率的观测数据每小时可以得到数十万的观测数据。 图 2 展示了 2019 年 IGS 以及中国陆态网，澳大利亚 GeoScience、新西兰 GeoGoing、美国/日本 GeoNet 的区域监测网的各站位置分布。

利用全球地基 GNSS 观测，人们可以获得海量的全天候、全球分布的电离层观测数据。如图 2 地基 GNSS 观测台站主要分布在大陆上，少量建在海岛上，导致在海洋区域的地基 GNSS 电离层观测数据十分稀少。如果要建立全球电离层模型，需要补充海洋区域的观测数据。

2.2　空基 GNSS 电离层观测

空基 GNSS 电离层观测数据主要分为三种：(1) 用于卫星定轨过程中的定位数据可以获得卫星到导航星之间斜向电子总量；(2) 卫星到导航星之间发生掩星时可以得到电离层掩星

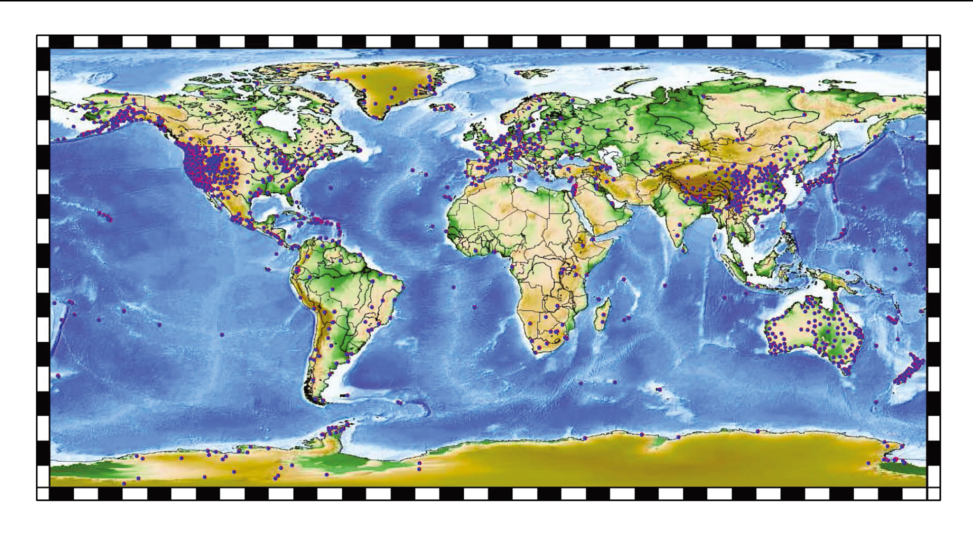


图 2　2019 年全球 IGS 站及区域监测网分布图

观测数据；(3) 测高类卫星可以获得卫星高度到地球表面之间的垂直电子总量。从电离层观测的角度来看，基于电离层临边探测的掩星数据具有高精度、高垂直分辨率、完整的全球覆盖以及无电离层偏差等优势。2006 年中国台湾和美国联合发射的 6 颗低轨卫星星座组成的 COSMIC 系统为电离层研究提供了大量的掩星观测数据。当然近年来由于 COSMIC 星座运行寿命已尽，只能提供很少的观测数据，但是采用 GPS 和 GLONASS 双模观测的 6 颗低轨卫星星座 COSMIC-2 已于 2019 年发射，将提供更多的空基电离层观测数据。如图 3 所示，CDAAC/UCAR 近实时处理和存档 10 多个掩星任务数据，提供了进行全球三维电离层电子密度重构及重分析的一个机遇。图 4 使用表 1 中的参数模拟了 2008 年 01 月 10 日全天 328 个 IGS 观测站对 GPS 和 GLONASS 两个星座系统的电离层地基观测数据的电离层穿刺点 (ionospheric piercing points, IPP)，以及 COSMIC 六个卫星对 GPS 星座的电离层掩星观测数据的电离层切点 (the target point of the occultation signal path, OccTarget) 的分布情况。从图 4 中可知，电离层掩星观测数据可以极大地改善电离层地基观测数据在海洋区域观测匮乏问题；然而相对于众多电离层地基观测数据，仅由 COSMIC 低轨卫星星座产生的电离层掩星观测数据较少，导致海陆观测资料分布依然不均衡。

表 1　地基/星载电离层观测

模拟系统	地基	星载
导航星座及卫星数	GPS +GLO(56)	GPS (32)
接收机载体及数目	IGS (256)	COSMIC (6)
截至高度角/(°)	15	—
采样率/s	300	5
观测数目/h	约 10 000	约 10 000

近 5 年内，OneWeb、SpaceX 和 Boeing、Samsung、航天科工集团及航天科技集团等，

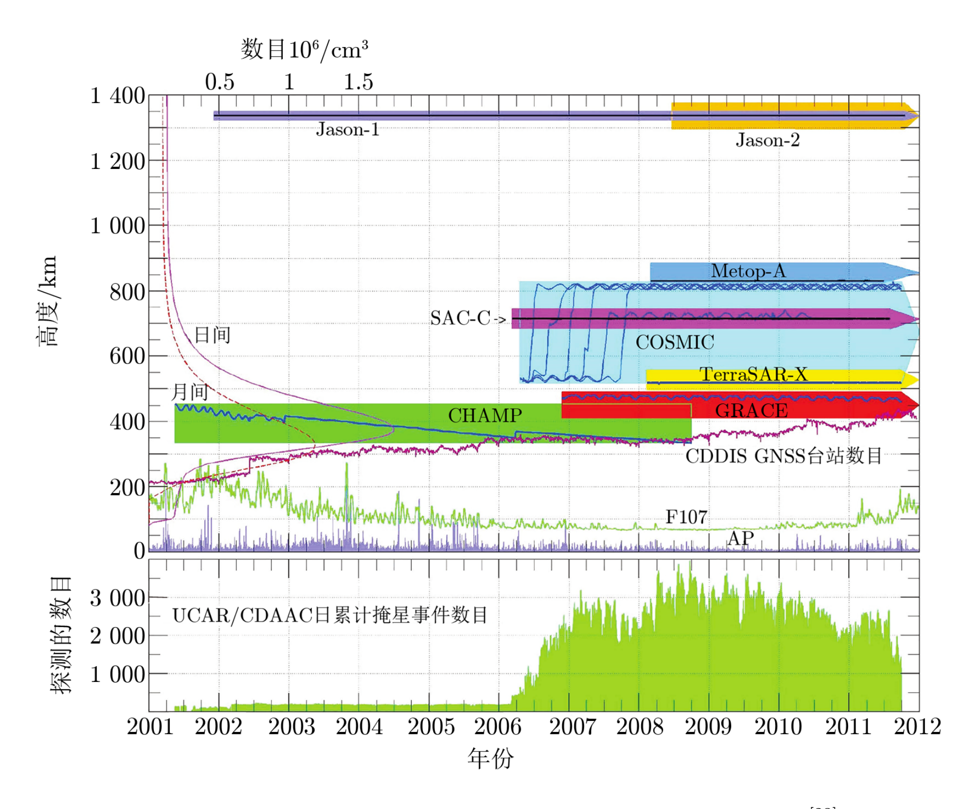


图 3 2001—2012 年间携带掩星有效载荷的卫星任务掩星数据[23]

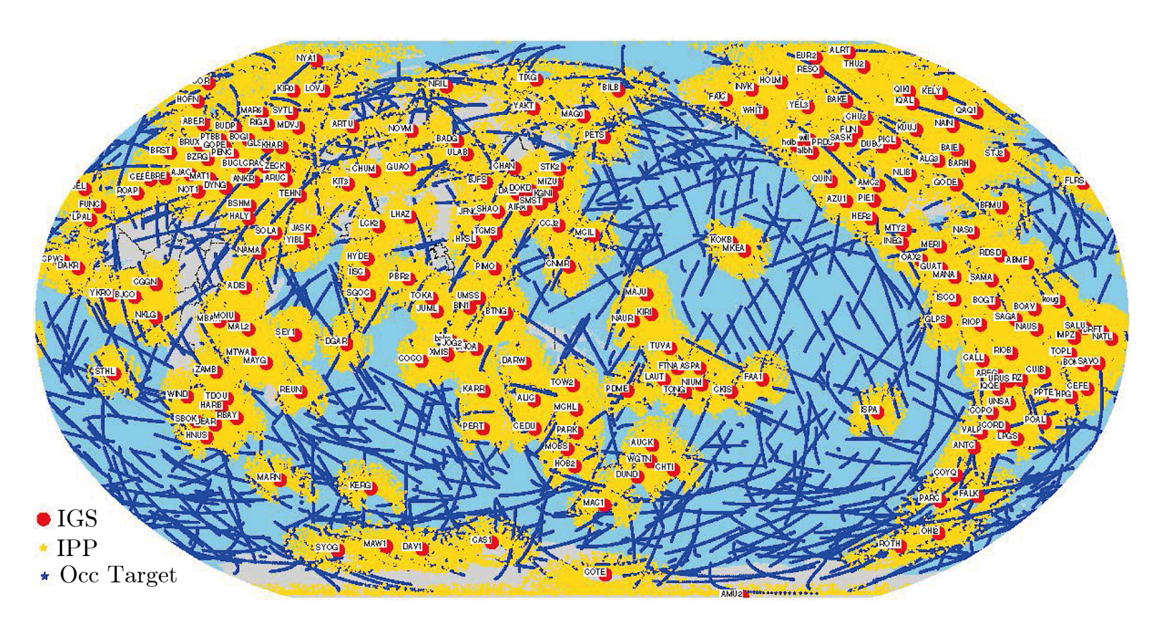


图 4 全天电离层观测数据分布情况

为了基于太空向全球提供无缝且稳定的互联网服务，各自先后设计、部署、并计划发射数十至上万颗不等的商业低轨卫星星座。Zhang 和 Ma [32] 整理了各卫星星座设计参数，如表 2 所示。而 Reid 等人[33] 从整个系统的架构，包括星座几何图形条件、空间信号测距误差、星载原子钟性能和定轨方法等方面，全面探索其扩展成为导航增强星座的可能性，结果令人振奋。电离层掩星载荷未来小型化与低成本化，将其搭载在不同导航增强星座上，可以形成分布更均匀，数目更多的电离层掩星事件，进而获得更多电离层掩星观测数据用于电离层三维重构。

表 2　部分已部署或提出的商用低轨星座汇总[32]

星座	卫星数	高度/km	倾角/(°)	建成时间/年份	国家	主要业务
Iridium	66	780	86.4	1998	美国	语音+STL
Globalstar	48	1 400	52	2000	美国	语音
Iridium NEXT	75	780	86.4	2019	美国	宽带+STL
OneWeb	648	1 200	88	2027	美国	宽带
	1 972	—				
SpaceX Starlink	1 600	1 150	53	2024	美国	宽带
	1 600	1 110	53.8			
	400	1 130	74			
	375	1 275	81			
	450	1 325	70			
	7 518	340	—			
Boeing	1 190	1 200	45	-	美国	宽带
	612		55			
	1 155		88			
LeoSat	108	1 400	—	2020	美国	宽带
Telesat	72	1 000	99.5	2022	加拿大	宽带
	45	1 248	37.4			
Kepler Comunications	140	—	—	2022	加拿大	物联网
Astrocast	64	600	—	2021	瑞士	物联网
Yaliny	135	600	—	—	俄罗斯	宽带
Astrome	150	1 400	—	2020	印度	宽带
Samsung	4 600	1 400	—	—	韩国	宽带
Hongyan	54	1 100	—	2023	中国	宽带+导航增强
	270	—	—	—		
Hongyun	156	1 000	—	2022	中国	宽带+导航增强
CentiSpace	120	700	—	2021	中国	宽带+导航增强

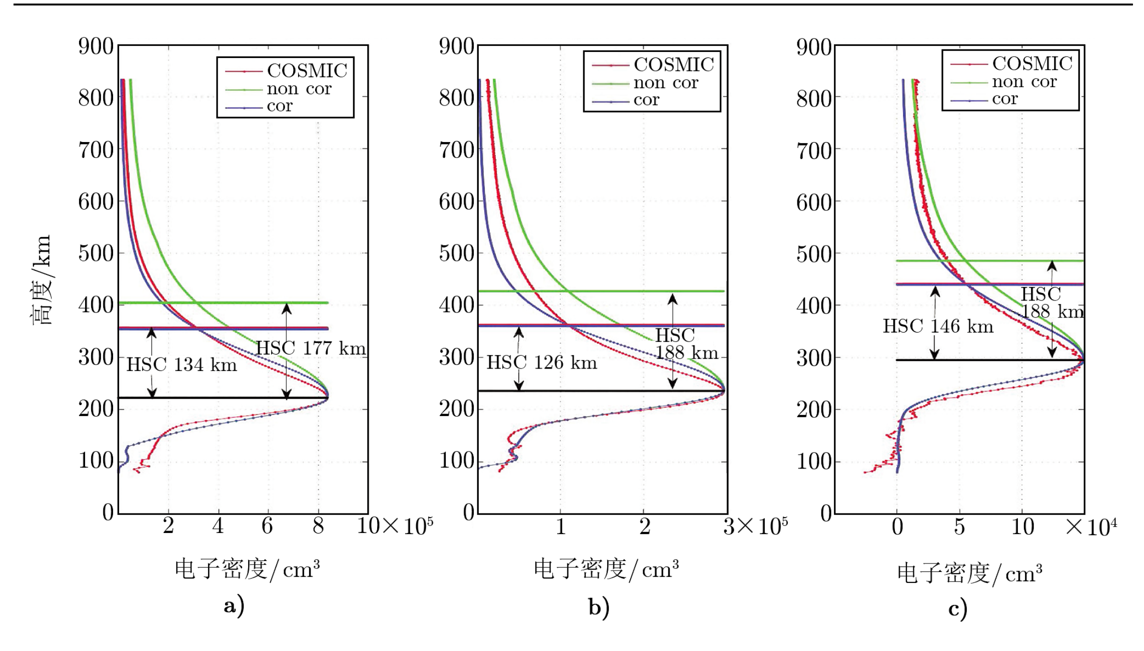
3 多源观测 GNSS 数据应用于电离层经验模型

从 SAMI2/3 模型[34, 35]到 NCAR/TIEGCM 模型[36, 37]，再到覆盖从地面到磁层的整体模型 (ground-to-topside model of atmosphere and ionosphere for aeronomy, GAIA)[38]，及已/正在扩展的包括带有热层和电离层扩展的整个大气的气候模型 (the thermosphere and ionosphere extension of the whole atmosphere community climate model, WACCM-X)[39, 40]，电离层理论模型获得了长足的发展。以 GAIA 模型为例，GAIA 是三个独立开发的模型的组合，包括整个大气层 (从对流层到热层)、一般环流模型 (GCM)、电离层模型和电动力学模型。GAIA 的核心是一个“耦合器”模块，用于管理三种模型之间的差异。相对于其他整个大气层的模型 (如 TIE-GCM)，只有 GAIA 模拟了从地球表面到热圈的中性大气[41]。相对而言，电离层理论模型作为同化模型的初始场并没有电离层经验模型精度高，往往将其作为卡尔曼滤波的动力学部分，所以利用多源数据改进电离层经验模型是当前的研究热点之一。由于电离层 F2 层顶部区域空间环境复杂且探测数据少，IRI 模型、GCPM 模型以及 IRI_Plas 模型在电离层顶部建模做了大量工作。这里主要介绍IRI模型及基于掩星资料改进 IRI 模型的研究进展[42–45]。

国际参考电离层 IRI 基于对地面和空间电离层等离子体的大多数可用和可靠的观测结果，描述了高度 60～2 000 km 范围内的电子密度、电子温度、离子温度、离子组成以及其他参数的月平均值。相比 IRI2012，最新版本的 IRI2016 有两个新的关于 F2 层峰值高度选项，以后不再依赖与传播因子 M(3000) 的关系来描述 F2 层峰值高度：一个是基于电离层测高仪数据[46]，被推荐以获得更加准确的电离层的电子密度分布场[7]；另一个基于掩星观测数据[47]。

相比于地基 GNSS 电离层观测，电离层掩星观测具有无偏性与全球覆盖的优点。近年来，许多研究人员做了大量研究[48–53]以结合 COSMIC 电离层掩星观测改进电离层顶部经验模型。采用经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分析方法，处理 2007—2011 年间 COSMIC 电离层掩星数据并重建了电离层标高模型，其中地磁纬度 (87.5°S—87.5°N) 的空间分辨率为 5°，时间分辨率为 2 h。通过 EOF 分析，发现标高的特征主要体现在地磁纬度、年度、季节和昼夜变化中，如图 5 所示，通过将比例因子 q 作为附加约束改进国际参考电离层 IRI2007[54]的顶部模型，这一部分曲线拟合精度得到极大提高[44]，并将这一模型辅助 Abel 反演以验证其精度[42]。另一方面，在 2018 年通过 COSMIC 的顶部总电子密度观测及映射函数得到垂直电子密度总量，再利用垂直电子密度总量与来自 COSMIC 电离层掩星数据中的卫星轨道高度处的电子密度和顶部区域标高关系，建立了 800 km 以上区域的电离层电子密度指数衰减模型，以用于电离层顶部及等离子体层影响的评价，或误差的消除[43]。

基于 COSMIC 电离层掩星电子密度曲线数据建立的电离层标高模型作为附加约束改善了 IRI 的顶部模型，但恒定的标高不适合描述电离层电子密度的物理特性，尤其在等离子体层会低估电子密度。因此，利用 Vary-Chap 变标高 (Vary-Chap scale height, VCSH) 技术有



注：a) 日期为 2007.030，世界时为 10.1958，纬度为 24.97，经度为 105.40；b) 日期为 2007.030，世界时为 10.2158，纬度为 34.75，经度为 95.66；c) 日期为 2007.030，世界时为 10.2800，纬度为 40.07，经度为 129.85。“HSC”表示 F2 层顶部标高，“non cor”表示 q 因子约束校正前，“cor”表示 q 因子约束校正后。

图 5　比例高度约束引入 IRI 前后，三个反演结果与检索对应的 COSMIC 模拟轮廓的比较结果[44]

望进一步改善电离层顶部电子密度模型。Vary-Chap 变标高 $H(h)$ 于 1969 年首先被引入到一般 α-Champman 电子密度分布[55]：

$$N_e(h) = N_m \left(\frac{H_m}{H(h)}\right)^{1/2} \exp\left[\frac{1}{2}(1 - z - \exp(-z))\right] \quad , \tag{1}$$

$$z = \int_{h_m}^{h} \frac{\mathrm{d}h}{H(h)} \quad , \tag{2}$$

其中，z 为一中间参数；N_m，h_m 分别代表 F2 层峰值密度及高度；$N_e(h)$ 表示在高度 h 处的电子密度；$H(h)$，H_m 是高度 h 及 F2 层峰值高度处的标高，即 $H_m = H(h_m)$，$H(h)$ 是关于未知量 H_m 的函数。利用 2008 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日的 COSMIC 电子密度廓线数据，得到两个由指数形式的权重控制的线性 ax 形状与抛物线 bx^2 形状模式组合的形状函数，拟合代表较低和较高高度的 Vary-Chap 标高廓线：

$$y = ax\frac{\mathrm{e}^x - \mathrm{e}^{-x}}{\mathrm{e}^x + \mathrm{e}^{-x}} + bx^2\mathrm{e}^{-2x} \quad , \tag{3}$$

其中，$y = \ln(H(h)) - \ln(H_m)$，$x = \dfrac{h - h_m}{h_m}$ 是中间变量，用以建立标高与高度之间的关系；a 与 b 分别是线性与抛物线模式形状的拟合参数。当使用具有权重的线性模式 ax 和抛物线模式 bx^2 来表示 VCSH 轮廓的形状时，拟合的 VCSH 和重建的电子密度轮廓与原始观测值

非常吻合；在所有研究的年份中，大多数拟合残差都小于 10%。参数 a 的范围为 1.0～2.0 (每月平均值)，与地磁场线高度相关，并且在白天和高活动年位于低纬度和中纬度区域较大；而参数 b 与转换高度 h_c (两种形状模式的交点) 的变化规律与磁赤道异常 (the equatorial ionization anomaly, EIA) 极为相似[45]。a 和 b 参数化拟合函数可以将 VCSH 轮廓以合理的精度简单表示，可以结合 F2 层的峰值电子密度、峰值高度和标度高度在任何给定的时间和位置重建电子密度分布；经过仔细验证，它可以作为另一个 topside 选项引入 IRI 模型[45]。

4 多源 GNSS 观测数据应用于电离层同化模型

近年来，基于代数重建技术，电离层层析成像算法已广泛用于电离层 3D 结构的重建[17, 18]。然而，电离层的观测数据空间分布差，层析成像结果缺乏空间连续性。Lorenc mbox[56]采用卡尔曼滤波方法提出了三维变分同化作为现代数据同化的经典方法。图 6 展示了同化后的电离层三维模型在经度、纬度及高度上的切片，它更细致地描述出电离层三维结构特性，特别是电离层赤道附近的不规则形状。

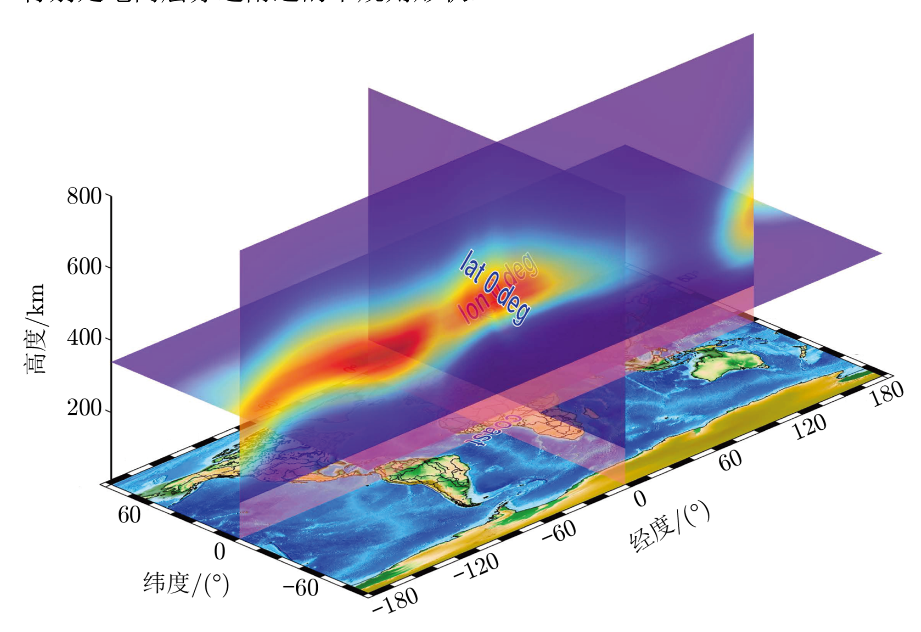


图 6 电离层电子密度场沿经度、纬度及高度上的切片

与层析成像算法相似，电离层同化算法利用观测值来更新背景场：基于电离层电子密度背景场及观测数据各自的协方差，构造和求解与观测值和背景场有关的价值函数极小值，然后得到同化结果。该方法可以保持电离层的光滑物理结构，并且更接近真实电离层分布的电子密度场。Huang 提出的空间滤波方案避免了 3D-Var 寻找背景场误差协方差逆矩阵[26]，但是多源 GNSS 电离层观测数据的增多，依然对计算机的内存与计算能力有极高要求。采用逐步双层同化方法来减少电离层顶部区域对电离层底部区域同化的影响[31]：同化低轨卫

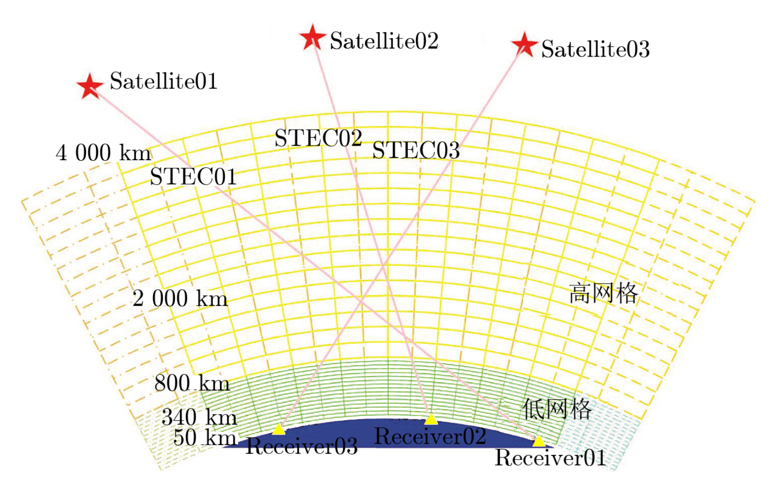
星定位观测获得斜向 TEC 信息，得到电离层 800 km 以上区域电子密度分布模型；再同化掩星观测数据与扣除 800 km 以上电离层的地面 GNSS 电离层观测，获得 800 km 以下的电离层电子密度分布模型，以得到更准确的 F2 层电离层结构。这种方式可以减少分步同化中未知量数目，进而节省计算时间与计算机内存。

可以看到，多源及多模 GNSS 电离层观测数据的引入，使得电离层同化模型有了新的要求与发展：(1) 为保证多源及多模 GNSS 电离层观测数据特征及精度，同化模型中各种误差源需要更细致的分析，并寻求方法加以消除；(2) 需要对多源及多模 GNSS 电离层观测数据在同化模型中的改进效果进行评价，由于观测数据增多要求算法设计需适应计算效率。

4.1　同化算法中的误差分析

在电离层同化过程中，背景场误差分布的假设、观测数据的穿刺路径分布、观测数据的权重，以及对矩阵解进行稀疏优化等都可能导致同化结果出现误差。对误差源进行分类并有效地改善这些误差是提高同化结果精度的重要手段，可将电离层误差源分为算法误差与模型假设误差。

虽然算法误差难以扣除，通过模拟已验证，经验性调整电离层背景场误差及相关系数、背景场权重与各不同观测误差，同化结果误差可降低到真实场的 20%，而整体偏差小于 5%。然而几个来源于同化过程假设的误差，使得模拟观测数据与固定背景场误差具有大的系统偏差，但已验证可以通过算法进行改进。如图 7 所示，电离层顶层及等离子体层影响、电离层时间变化影响、格网代表性误差等可以通过有效的方法减弱，都属于模型假设误差。以电离层顶层及等离子体层影响为例，这一部分对 GPS 的 TEC 的贡献随一天中的时间变化，从昼夜平分的最低 (约 12%) 到冬天夜间的最大 (约 60%)[57]。而以 GCPM 模型进行模拟统计后，发现所有模型假设误差一般情况下可能达到 10%～20%，与诸多学者结论一致[13, 36, 57]；扣除电离层顶层及等离子层影响后，则减弱到 8% 左右。



注：“STECXX”表示斜向电子总量观测 (XX 表示编号)，“SatelliteXX”表示 GNSS 导航星，“ReceiverXX”表示地面观测站。

图 7　电离层顶层及等离子层影响、电离层时间变化影响、格网代表性误差对同化过程的综合作用示意图

对于电离层顶部及等离子体层影响，掩星数据可以用于顶部区域来获得更准确的顶层电子密度衰减函数的基数[44]，而 COSMIC 项目中的 LEO 卫星轨道高度约为 800 km，所以接近卫星轨道高度的校正电子总量可以作为电离层同化的约束，从而实现顶部和底部区域同化模型之间的一致性和连续性。在处理观测数据时，选择顶部区域和底部区域用于逐步同化。首先，将顶部区域的经验模型 (比如 IRI_Plas[12]) 用作背景场，并通过提供 podTec 数据获得顶部区域的同化模型。然后，从地面观测数据中减去顶部区域贡献，其与 800 km 以下的电离层经验模型作为底部区域的背景场进行同化后，获得底部区域的高精度电离层三维电子密度场[31]。其同化结果表明，在减去电离层顶部的影响后，平静期的电离层偏差从 1.645TECu 改善到 1.464 TECu；当电离层处于活跃期时，标准偏差从 4.408TECu 降低到 3.536 TECu。

虽然电离层在同化时间段内变化明显，但一般在电离层反演中假定在 1 h 或 2 h 内是固定不变的，这导致电离层反演过程中因为时间变化引起的误差增大了电离层同化结果的误差。减少时间窗口可以提高同化结果的准确性，还可以减少每次同化的观测次数，从而减少每种同化算法的执行时间[58]。但是，减少观测值可能会影响其在电离层网格中分布的均匀性。因此，需要找到一种减轻同化窗口时间内电离层变化影响的方法。忽略电离层赤道异常情况下在地磁坐标下随太阳直射点移动，电离层分布具有一定的时间平移性，所以通过射线时间与电离层背景场时间的较差，通过公式进行地磁经度平移可获得校正后射线坐标：

$$\phi_{\rm mag}{}' = \phi_{\rm mag} + (MJD_{\rm background} - MJD_{\rm ray}) \times 360^\circ \quad , \tag{4}$$

其中，$\phi_{\rm mag}$，$\phi_{\rm mag}{}'$ 分别是校正前后的地磁经度，$MJD_{\rm ray}$，$MJD_{\rm background}$ 分别是观测数据和电离层背景场时间对应的儒略日期。经过统计相对精度发现，通过地磁坐标校正时间偏差的方法校正不同时刻的倾斜 TEC，其结果在一天之内每小时都产生稳定的积极影响，电离层时间变化的影响为 9.27%，经过地磁坐标时间校正后，降低到 5.62% (约 0.3 TECu)。

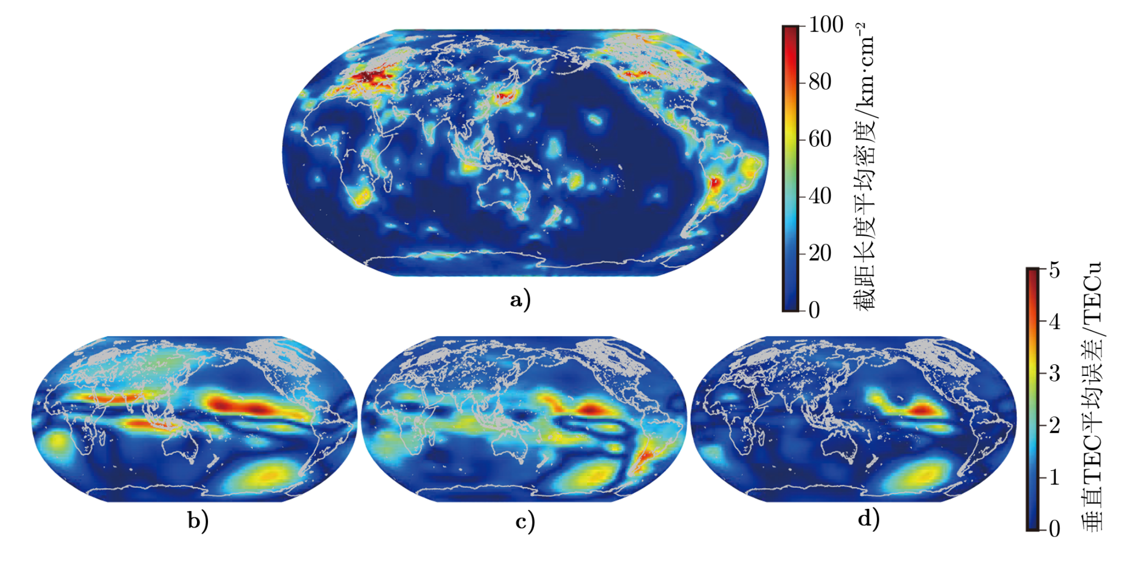
在电离层格网化中，经典路径追踪方式通过射线穿过每个格网的距离形成了整个射线路径，然后通过每个格网截距及其对应格网中心的电子密度来表示每段路径贡献的电子量。然而当穿刺路径处于格网一隅，或是四角，或是极为接近另一个格网时，再次以当前格网中心的电子密度来表示此段路径上的平均密度并不合适，而穿刺截距的中点 p 所在位置的电子密度可以更精确地代表此段路径上的密度。点 p 的密度可以通过其周边格网中心密度加权表示，所以我们可以得到以下关系式：

$$NE_{\rm segment} \approx NE_{\rm p} \approx \sum_i w_i NE_{x_i} \quad , \tag{5}$$

其中，$NE_{\rm segment}$，$NE_{\rm p}$，NE_{x_i} 分别是截距平均密度、截距中点密度及周围网格的密度，w_i 是每个密度的权重。经过统计双线性系数加权表示格网截距的密度后，发现原来电离层网格表示的误差约为 2.5%，但使用双线性插值方法后降低到 0.9%。

图 8 模拟了 GPS 地基观测数据空间分布、电离层顶部和等离子体层影响、电离层时间变化、格网代表性误差三种模型假设误差影响校正前后同化 GPS 地基观测数据获得的电离

层密度分布模型精度。由图 8a) 可见，地基 GPS 电离层观测数据主要分布在大陆及一些岛屿附近；由图 8b),c) 可知，忽略模型假设误差与同化地基电离层观测数据获得的电离层密度分布模型相比，同化模型初始场在全球范围内精度有明显提高，在赤道附近及海洋区域有较大误差；图 8c),d) 说明地基 GPS 电离层观测数据经过模型假设误差校正之后，同化地基电离层观测数据获得的电离层密度分布模型在南美洲及赤道附近的误差大幅度降低了。



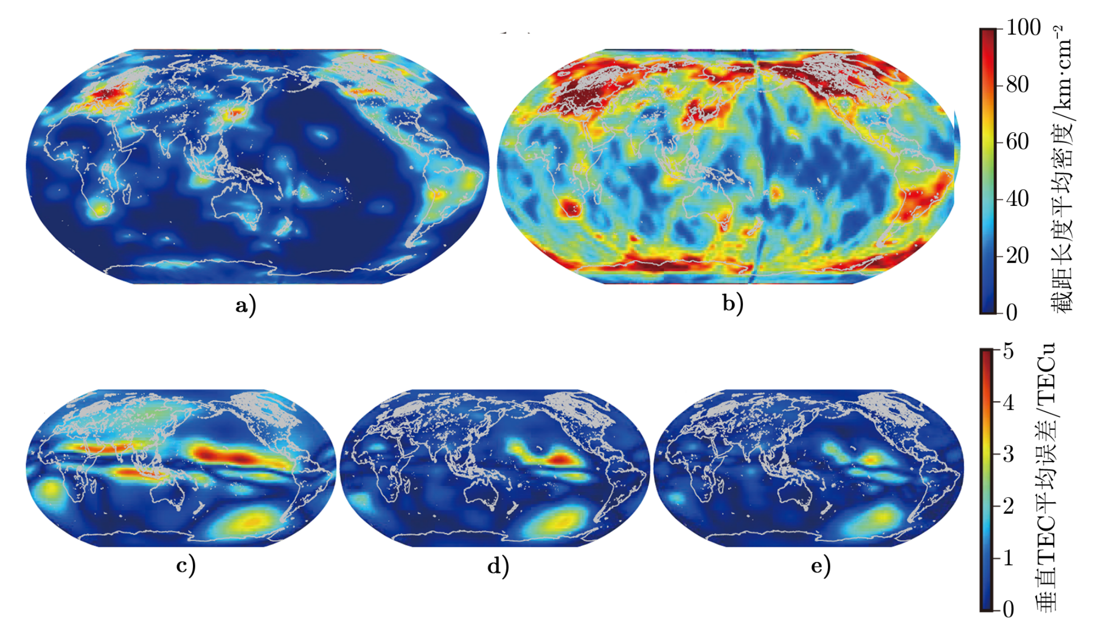
注：a) GPS 地基观测数据水平穿刺信息；b) 初始场垂直 TEC 的平均误差；c) 假设误差校正前垂直 TEC 的平均误差；d) 假设误差校正后垂直 TEC 的平均误差。

图 8　日均水平穿刺信息及垂直 TEC 的平均误差分布

4.2　多源及多模数据的使用

基于全球导航卫星系统对地面站电离层总电子含量的观测，CHAMP (challenging minisatellite payload), GRACE (gravity recovery and climate experiment), COSMIC, SAC-C (satellite de aplicationes cientificas-B), Metop-A (meteorological operational satellite - A) 和 TerraSAR-X 卫星对电离层无线电掩星的观测，Jason-1/Jason-2 垂直电子总量测量等多源数据，2012 年通过国际参考电离层 IRI2007 模型和卡尔曼滤波技术构建了 2002—2011 年全球三维电离层数据同化模型[23]。同时 COSMIC 的顶部斜向电子总量也被用来建立顶部垂直电子总量模型，或者通过同化和层析的方式来建立电离层顶部及等离子体层电子密度模型[19, 59]。COSMIC 运行寿命将尽，但 COSMIC-2 星座计划 (在 500 km 高度上拥有 6 颗 24° 倾角卫星，在 800 km 高度上拥有 6 颗 72° 倾角卫星) 可以更好地替代。通过设计和模拟掩星观测数据，并基于经验国际参考电离层模型和卡尔曼滤波器，建立了一个高度范围在 80～3 000 km 的全球电离层数据同化模型。同化结果验证模拟的 COSMIC-2 掩星观测数据补充了现有的地面 GNSS 观测网；同时 24° 和 72° 倾角卫星可以互补，优化全球电离层建模[20]。具有 GPS 和 GLONASS 双模观测的 COSMIC-2 计划已于 2019 年发射，但由于经费问题，仅由6 颗覆盖中低纬的 24° 倾角低轨卫星星座组成，仅为中国台湾提供空间服务。基

于表 1 中的参数进行 GNSS 电离层观测数据模拟，图 9 展示了单一 GPS 星座地基观测数据与多模地基和掩星观测数据的空间分布对比，以及数据应用于同化的结果精度改进情况。由图 9a),b) 可知，多模地基及掩星观测数据在空间分布要比单一 GPS 地基电离层观测数据量更多，覆盖范围更全面；由图 9c),d) 可知，同化单一 GPS 星座地基电离层观测数据获得的电离层模型相比同化模型初始场在全球范围内精度有明显提高，海洋区域由于观测相对较少依然有较大误差；由图 9d),e) 可知，多模地基及掩星观测数据同化结果与 GPS 地基观测数据的同化结果相比，前者在海洋区域的误差更小，但是海洋区域依然有较大误差，需要更多电离层 GNSS 掩星观测数据。



注：a) GPS 地基观测数据水平穿刺信息；b) 多模地基及掩星观测数据水平穿刺信息；c) 初始场垂直 TEC 的平均误差；d) GPS 地基观测数据同化结果的垂直 TEC 的平均误差；e) 多模地基及掩星观测数据同化结果的垂直 TEC 的平均误差。

图 9　日均水平穿刺信息及垂直 TEC 的平均误差分布

当观测数据增多时，观测数据用于同化过程中需要更多时间和内存进行格网化构建观测算子，及进行方程求解。许多工作基于超算使用公共地球系统模型 (community earth system model, CESM) 或 DART (data assimilation eesearch testbed)，对电离层使用结构格网或跨尺度预测模型 (the model for prediction across scales, MPAS) 非结构格网电离层模型进行同化分析[58, 60]；还有许多研究人员通过使用稀疏矩阵及稀疏方程求解等方式降低电离层同化中对内存和计算量的极大要求[31, 61, 62]；为得到三维电离层主要变化规律或者异常分布特征，基于非均匀电离层格网划分构建电离层同化模型也可以在保证关注区域精度的情况下降低计算需求[12, 63]。

5　电离层应用及展望

通过利用理论模型/经验模型与多源电离层观测数据进行融合，获取精细三维电离层结构及变化有诸多方面的应用与研究。通过对流层、热层、等离子体层与电离层耦合的研究[59, 64–70]，可以揭示电离层磁暴物理过程[71–75]，暴雨时期闪电在电离层与平流层的作用过程[76]，厄尔尼诺-南方涛动 (the El Niño - Southern Oscillation, ENSO)[77] 与 TEC 之间的关系，以及监测电离层同震[78] 等。

电离层的研究依然是多元而兴盛的领域。从气象数据同化在物理及观测数据的深度耦合，到流体力学有限元分析方法可实现高动态流体的数值模拟收敛，它们将会对电离层数据同化有很大的指导意义；另一方面，新的算法与新的算力的加入，使得我们可以获得更加精细的电离层时空尺度特征。

5.1　自适应格网在电离层同化中的使用

电离层层析或同化需要对电离层空间进行格网化。可依据电离层中电子密度的高度分布规律，在电离层密度高度梯度变化较大区域使用较细密的划分，在其变化较小的区域使用较稀疏的划分。这种划分方式被应用到新版 IRI_Plas[12] 模型及 Wu 等人[63] 对电离层顶部和等离子体层同化的工作中，从而获得电子密度垂直分布上的细节。MPAS 是一个合作项目，旨在开发用于气候、区域气候和天气研究的大气、海洋以及其他地球系统模拟组件。它通过非结构化 Voronoi 网格和 C 网格离散化，允许球体的准均匀离散化和局部精细化，也可以预测格网边缘速度的正常分量，特别适合于高分辨率、中尺度大气和海洋模拟[79, 80]。上述两种方法都很难顾及到变化的电离层峰值高度在电离层建模中产生的影响。如果可以使用有限元方法中的自适应 Mesh 算法，对于电离层格网化依照电子密度的空间分布结构来规划，可以实现对电离层同化的空间分辨率和计算时间的优化。通过不同时刻的电子密度场的细节及其相关性来控制其电离层相对偏大和快速变化部分的细节，实现同化结果的三维相关性和空间整体连续性。

5.2　机器学习在电离层同化中的使用

基于多种电离层探测手段，人们通过多年电离层观测收集了海量多源电离层数据。深度挖掘电离层数据中的信息，并灵活应用到电离层建模及预测，将会加深人们对电离层的认识，同时也会为电离层异常预报与危害控制提供大量参考信息。长期斜向电子总量、GIM 及 ionPrf 数据等通过人工智能算法进行电离层电子密度、异常分类、参数预测或者 GIM 分布预测，都已陆续开展或已经有了初步研究[81–84]。

当然人工智能算法不仅仅对观测数据或得到的产品 (如 GIM 和电子密度) 等进行分类、拟合或预测，在构建三维电离层模型算法中使用深度学习框架也会有诸多优点：在电离层同化算法中，通过深度学习框架 (如 tensorflow[85] 及 GraphBLAS[86]) 已有的对 OpenCL (open computing language)[87] 或 CUDA (compute unified device architecture)[88] 的集成，将使得算法计算速度得到极大的提升。通过深度学习框架构造代价函数，然后利用多种优化策略，可使电离层同化算法获得极大改善。通过并行算法及稀疏矩阵可以极大节省物理内存并提

高电离层数据模拟及反演计算效率。

致谢

感谢 CDAAC 对涉及的所有 COSMIC 数据的开放访问，可以从网站 https://cdaac-www. COSMIC .ucar.edu/cdaac/products.html 下载当前工作中使用的 COSMIC 资料。

参考文献：

[1] Bychkov V L, Golubkov G V, Nikitin A I. The Atmosphere and Ionoshere: Dynamics, Processes and Monitoring, Netherlands: Springer, 2010: 387
[2] Ding M, Qiao S, Zhang B, et al. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 460
[3] Nava B, Coïsson P, Radicella S M. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(15): 1856
[4] Radiceila S M. Annals of Geophysics, 2009, 52(3-4): 417
[5] Bilitza D. Radio Science, 2001, 36(2): 261
[6] Bilitza D, Altadill D, Zhang Y, et al. Journal of Space Weather and Space Climate, 2014, 4: 7
[7] Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, et al. Space Weather, 2017, 15(2): 418
[8] Bilitza D, McKinnell L A, Reinisch B, et al. 2011, 85(12): 909
[9] Arikan F, Sezen U, Gulyaeva T L. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(10): 8092
[10] Gallagher D L, Craven P D, Comfort R H. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2000, 105(A8): 819
[11] Alçay S, Oztan G, Selvi H Z. Annals of Geophysics, 2017, 60(5): 7311
[12] Sezen U, Cilibas O, Arikan F, et al. Advances in Space Research, 2013, 55(8): 2106
[13] Gulyaeva T, Huang X, Reinisch B. Advances in Space Research, 2002, 29(6): 825
[14] Gulyaeva T, Arikan F, Stanislawska I. Earth, Planets and Space, 2011, 63(8): 929
[15] Gulyaeva T L, Huang X, Reinisch B W. Advances in Space Research, 2002, 29(6): 825
[16] Maltseva O A, Zhbankov G A, Mozhaeva N S. Advances in Radio Science, 2013, 11: 307
[17] Raymund T, Austen J, Franke S, et al. Radio Science, 1990, 25(5): 771
[18] Hong J, Kim Y, Chung J K, et al. Journal of Astronomy and Space Sciences, 2017, 34(1): 7
[19] Wu M J, Guo P, Xu T L, et al. Radio Science, 2015, 50(11): 1131
[20] Yue X, Schreiner W S, Kuo Y H, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 3759
[21] Yue X, Schreiner W S, Pedatella N, et al. Space Weather, 2014, 12(11): 616
[22] Yue X, Wan W, Liu L, et al. Radio Science, 2007, 42(6): 1
[23] Yue X, Schreiner W S, Kuo Y H, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012, 117(A6): 968
[24] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. Radio Science, 2004, 39(1): 2794
[25] Lorenc. J. Met Soc Japan, 1997, 75: 339
[26] Huang. Mon. Wea. Rev., 2000, 128: 2588
[27] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J. Advances in Space Research, 2003, 31(4): 819
[28] Thompson D, Scherliess L, Sojka J, et al. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68(9): 947
[29] Courtier P, Thepaut J N, et al. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1994, 120: 1367
[30] Wang C, Hajj G, Pi X, et al. Radio Sci., 2004, 39(1): 6
[31] Fu N, Guo P, Wu M, et al. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1172
[32] Zhang X, Ma F. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073

[33] Reid T, Neish A, Walter T, et al. Leveraging Commercial Broadband LEO Constellations for Navigating. https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=14729
[34] Huba1 J D, Sazykin S. Geophys. Res. Lett., 2014, 41: 8208
[35] Huba J D, Krall J, Drob D. Geophysical Research Letters, 2019, 46(14): 7937
[36] Cai Y, Yue X, Wang W, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(12): 10708
[37] Qian L, Burns A G, Emery B A, et al. Modeling the Ionosphere-Thermosphere System, 2013, 201: 73
[38] Jin H, Miyoshi Y, Fujiwara H, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2011, 116(1): 1
[39] Liu J, Liu H, Wang W, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018,123(2): 1534
[40] Verronen P T, Andersson M E, Marsh D R, et al. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2016, 8(2): 954
[41] Yamamoto M, Otsuka Y, Jin H, et al. Progress in Earth and Planetary Science, 2018, 5(1):26
[42] Wu M J, Guo P, Fu N F, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(7): 5995
[43] Wu M J, Guo P, Fu N F, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018, 123(11): 9815
[44] Wu M J, Guo P, Fu N F, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(6): 5675
[45] Wu M, Guo P, Chen Y, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020, 125(3): 637
[46] Altadill D, Magdaleno S, Torta J M, et al. Advances in Space Research, 2013, 52(10): 1756
[47] Shubin V N. Advances in Space Research, 2015, 56(5): 916
[48] Prol F D S, Hernández-Pajares M, Camargo P D O, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018, 123(3): 2104
[49] Wang S, Huang S, Fang H. Radio Science, 2015, 2018, 50(9): 866
[50] dos Santos Prol F, Themens D R, Hernández-Pajares M, et al. Surveys in Geophysics, 2019, 40(2): 277
[51] Hu A, Carter B, Currie J, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(6): 4926
[52] Li Q, Liu L, Jiang J, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(3): 2083
[53] Stankov S M, Jakowski N. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68(2): 134
[54] Bilitza D, Reinisch B. Advances in Space Research, 2008, 42(4): 599
[55] Rishbeth H, Eds. O K G. Introduction to Ionospheric Physics, Amsterdam: Elsevier, 1969: 47
[56] Lorenc A C. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1986, 474(112): 1177
[57] Balan N, Otsuka Y, et al. Earth Planets Spac, 2002, 54(1): 71
[58] Chen C H, Lin C H, Matsuo T, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 121: 5708
[59] Pinto Jayawardena T, Chartier A, Spencer P, et al. Journal of Geophysical Research A: Space Physics, 2016, 121(1): 817
[60] Liu H L. Modeling the ionosphere and thermosphere system, Geophysical Monograph Series (chap. 16, pp. 181 - 200). Washington, DC: Americal Geophysical Union, 2014: 59
[61] Yue X, Schreiner W S, Kuo Y H, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 3759
[62] He J, Yue X, Le H, et al. Space Weather, 2020, 18(3): 410
[63] Wu M, Guo P, Xu T, et al. Radio Science, 2015, 50(11): 1131
[64] Crowley G, Hackert C, Meier R, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2006, 111(10): 518
[65] Cummer S A, Li J, Han F, et al. Nature Geoscience, 2009, 2: 607
[66] Oliveira D. Revista Brasileira de Ensino de Fisica, 2014, 36(1): 1
[67] Zhang R, Liu L, Liu H, et al. Geophysical Research Letters, 2020, 47(6): 78
[68] Dhadly M S, Emmert J T, Drob D P, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(12): 10592
[69] Ridley A, Deng Y, Tóth G. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68(8): 839
[70] Sun Y Y. Geoscience Letters, 2019, 6(1): 14
[71] Meng X, Mannucci A J, Verkhoglyadova O P, et al. Space Weather, 2020, 18(2): 352
[72] Astafyeva E, Zakharenkova I, Förster M. Journal of Geophysical Research A: Space Physics, 2015, 120(10): 9023

[73] Ngwira C M, Habarulema J B, Astafyeva E, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(8): 7123
[74] Ghodpage R, Patil P, Gurav O, et al. Advances in Space Research, 2018, 62(3): 624
[75] Zolotukhina N, Polekh N, Kurkin V, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017, 122(2): 2484
[76] Shultz D. Charging Thunderclouds Affect Ionospheric Conductivity. https://eos.org/research-spotlights/charging-thunderclouds-affect-ionospheric-conductivity
[77] Sun Y Y, Liu H, Miyoshi Y, et al. Earth, Planets and Space, 2019, 71(1): 35
[78] Goto S I, Uchida R, Igarashi K, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(11): 9239
[79] Judt F. Journal of the Atmospheric Sciences, 2020, 77(1): 257
[80] Michaelis A C, Lackmann G M, Robinson W A. Geoscientific Model Development, 2019, 12(8): 3725
[81] El-Naggar A M. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(3): 425
[82] Gross N C, Cohen M B. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020, 125(1): 135
[83] Kim M, Kim J. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2016, 17(1): 64
[84] Orus Perez R. Advances in Space Research, 2019, 63(5): 1607
[85] Martín A, Ashish A, Paul B, et al. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems. http://tensorflow.org/. Software available from tensorflow.org, 2020
[86] Davis T A, Aznaveh M, Kolodziej S. 2019 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (H-PEC), USA: IEEE, 2019: 1
[87] The Khronos Group. OpenCL 3.0 (Provisional) Reference Guide. https://www.khronos.org/opencl/, 2020
[88] The NVIDIA. CUDA Toolkit—NVIDIA. https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit, 2020

Current Status and Development of 3-D Ionospheric Research Based on Multi-source GNSS Observation Data

FU Nai-feng[1,2], CHANG Ying-li[3]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In recent years, with the development of GNSS (Global Navigation Satellite System) technology, multi-source GNSS ionospheric observation data utilizes the spatial characteristics of ground-based and space-based GNSS ionospheric observations to form a more complete three-dimensional ionospheric observation system, promoted the progress of the ionosphere in theoretical models, empirical models, and assimilation models also provided observations and methods for physical mechanisms of extreme weather, solar activity, and magnetic storm events by combining atmosphere and plasmasphere researches. The development status of ground-based and spaceborne GNSS ionospheric observation data,

and the progress of spaceborne GNSS ionospheric observation data in the improvement of the empirical model of the topside ionosphere were displayed. The new developments and requirements in the process of an ionospheric assimilation model under the background of increasing multi-source GNSS ionospheric observation data are summarized, and it is pointed out the following tips: (1) Due to the higher accuracy of the ionospheric empirical model, it can be used as the initial field of the assimilation model. (2) The theoretical ionospheric model can be used as the dynamic part of the Kalman filter. (3) It is possible to use multi-source data to reconstruct or predict the ionosphere with assimilation. And, it also pointed out that technologies such as adaptive meshing and machine learning can become new research directions of ionospheric assimilation algorithm to promote the research of 3D ionosphere.

Key words: GNSS; ionosphere; empirical models; assimilation models